

文章编号:1671-8879(2014)04-0007-06

冻土融沉对路面结构力学响应的影响

张久鹏^{1,2},袁卓亚³,汪双杰²,陈建兵²,金龙²

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司
多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,陕西 西安 710075;
3. 中国交通建设股份有限公司西北区域总部,陕西 西安 710068)

摘要:为研究冻土融沉规律及其对沥青路面结构的影响,结合青藏高原地区实测温度数据,运用数值模拟技术研究多年冻土地地区路基温度场变化特性,分析特定温度场条件下冻土路基融沉规律,再以该融沉曲线为路面结构的位移边界,计算了路面结构的融沉附加应力,并与无融沉时的结构响应进行了比较。研究表明:冻土路基从表面逐渐向内融化,当外界温度较低时,路基土内部还存在冻土核,当外界温度足够高时,则路基土内部可能全部融化;当融深较大时,固结沉降较大,反之则较小;冻土路基融沉变形曲线近似于抛物线形状,回归建立了路基融沉变形公式,而在此位移边界条件下,路面结构产生附加应力,会对结构产生不利影响。

关键词:道路工程;多年冻土;融沉;力学响应;数值模拟

中图分类号:U416.168

文献标志码:A

Effect analysis of thaw settlement of permafrost on mechanical responses of pavement structure

ZHANG Jiu-peng^{1,2}, YUAN Zhuo-ya³, WANG Shuang-jie², CHENG Jian-bing², JIN Long²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Permafrost Region, Ministry of Transport, CCCC First Highway Consultants Co Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. China Communications Construction Company Limited Northvest Regional Headquarters, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the thaw settlement of permafrost and its effect on the asphalt pavement according with the actual data of temperature in Tibet, the characteristics of subgrade temperature field in permafrost region and the thaw settlement of subgrade under the specific temperature field were studied by numerical analysis, and the extra-stress of pavement structure was calculated by taking the thaw settlement curve as the displacement boundary which was compared with that without thaw settlement. The results show that the permafrost subgrade thaws from surface, and there is a frozen core when the temperature is lower outside, but the permafrost subgrade may thaw entirely when the temperature is higher. The thaw settlement and consolidation are bigger when the thaw depth is deeper, and vice versa. The curve of thaw settlement and consolidation is similar to a parabola, and the regression formula can also be established. Under the displacement boundary of thaw settlement, the surface structure produces an extra-stress which is a serious adverse impact on pavement structure. 3 tabs, 11 figs, 8 refs.

收稿日期:2013-07-26

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JQ7278);多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KFKT201202);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC002)

作者简介:张久鹏(1983-),男,江苏盐城人,副教授,工学博士,E-mail:zhjiupeng@163.com.

Key words: road engineering; permafrost; thaw settlement; mechanical response; numerical simulation

0 引言

自 1953 年中国开始修筑青藏公路,40 多年来冻土地区筑路技术取得了很大进步,冻土工程科研与技术人员进行了长期研究探索工作,并取得了一定的成果^[1-2]。陈建兵等在大量实地调查研究的基础上,研究了以纵向裂缝为主的青藏公路高路基病害的形成及其机理^[3];李祝龙分析了青藏公路一期整治工程路段路基路面发生病害的作用机理,讨论了气候条件、高原工程地质条件、交通量及轴载条件、施工条件等对路基路面结构的影响^[4];裴建中等根据青藏公路纵向裂缝现场勘察和形成机理分析,认为导致路基纵向裂缝的主要原因是路基边坡脚下融化区的产生及发展^[5];侯曙光等为了正确预测多年冻土路基变形,将多年冻土路基变形单变量混沌时间序列进行相空间重构,利用偏最小二乘法对所构造的自变量进行主成分提取,建立路基变形预测模型,借助多种评判指标进行模型精度分析,并绘制了预测值与实测值散点图^[6];张喜发等根据路基冻害钻探调查和现场观测资料,对融沉系数与含水量和干重度的关系进行了统计分析^[7]。限于对冻土内在规律的认识,以及冻土与工程相互影响的认识,多年冻土地区公路建设仍有不少问题尚待进一步研究解决,如多年冻土地区的路基普遍存在融沉变形。一般来说,均匀沉降对路面使用不会造成较大影响,而不均匀沉降变形会引起路面较大的附加应力,有时可能超过行车荷载引起的应力,而导致路面出现早期破坏,均尚待进一步探索和研究。为此,本文结合青藏高原地区实测数据,运用数值模拟技术研究多年冻土地区路基温度场变化特性,在此基础上分析冻土路基融沉规律及路面结构的力学响应,为青藏高原多年冻土路面设计与分析提供理论依据。

1 冻土路基温度场的数值模拟

1.1 路基温度场的几何模型

根据冻土的热特征及传导方程,采用 ABAQUS 有限元程序进行了冻土路基温度场的数值模拟。路基顶面宽 10 m,高 2 m,边坡 1:1.5。土基计算范围取坡脚向外各 5 m,坡脚深度下 5 m。路基横断面如图 1 所示。

1.2 材料参数

根据青藏高原多年冻土地区的土质调查结果,确定分析断面的土基为单层亚粘土,路基土导热系

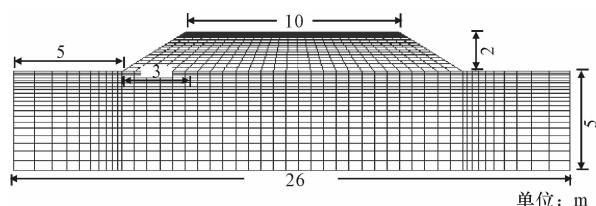


图 1 温度场计算模型

Fig. 1 Numerical model of temperature field

数、比热容计算式为

$$\begin{cases} k_f = 0.104 \times 10^{-3} r_d^{0.921} + 3.72 \times 10^{-5} r_d \theta \\ k_u = 0.408 \times 10^{-3} r_d^{0.945} + 1.72 \times 10^{-5} r_d \theta \\ C_f = r_d (0.914 + 0.023 \theta) \\ C_u = r_d (0.865 + 0.041 \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_d 为干密度 (kg/m^3); θ 为含水量 (%); k_f 、 k_u 分别为冻土、未冻土的导热系数 ($\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$); C_f 、 C_u 分别为冻土、未冻土的比热容 ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)。

按式(1)计算得到相变区的导热系数和比热容,相转化区的温度范围可按表 1 确定。可以看出,冻土和融土的导热系数、比热容随干密度增大而增大;当土体的干密度相等时,导热系数和比热容均随含水量增加而增大。本文设定土的含水量为 10%。

表 1 相转化区的温度范围

Tab. 1 Temperature ranges for phase inversion

土名	剧烈转化区/ $^\circ\text{C}$	过渡区/ $^\circ\text{C}$	实际冻结区/ $^\circ\text{C}$
亚粘土	0~-2	-2~-5	≤ -5

1.3 边界条件

冻土温度场有限元模型的边界条件,基本上限于考虑第一类边界条件^[8]。对青藏公路某一断面进行了温度测量,根据回归分析建立了相关边界条件。

天然地表

$$T = \begin{cases} -4 \times 10^{-6} t^3 + 0.001 4 t^2 - 0.006 27 t - 7.707 9, & t \leq 180 \\ 3 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.001 3 (t-180)^2 + 0.081 1 (t-180) + 4.093 8, & t > 180 \end{cases} \quad (2)$$

左边坡

$$T = \begin{cases} -6 \times 10^{-6} t^3 + 0.002 2 t^2 - 0.086 5 t - 9.026, & t \leq 180 \\ 6 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.002 4 (t-180)^2 + 0.131 7 (t-180) + 9.882 3, & t > 180 \end{cases} \quad (3)$$

右边坡

$$T = \begin{cases} -6 \times 10^{-6} t^3 + 0.002 2 t^2 - 0.086 5 t - 9.426, & t \leq 180 \\ 6 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.004 2 (t-180)^2 + 0.131 7 (t-180) + 9.482 3, & t > 180 \end{cases} \quad (4)$$

路表温度

$$T = \begin{cases} -6 \times 10^{-6} t^3 + 0.002 t^2 - 0.043 t - 8.2465, & t \leq 180 \\ 6 \times 10^{-6} (t-180)^3 - 0.0025 (t-180)^2 + 0.1436 (t-180) + 12.167, & t > 180 \end{cases} \quad (5)$$

土基的左右边界

$$T = \begin{cases} -0.1205 h^2 + 0.22 \times 10^{-4} t^2 + 0.0105 th - 0.06146 t + 1.8486, & t \leq 180 \\ 0.1826 h^2 - 8.77 \times 10^{-5} (t-180)^2 + 0.084 h + 0.02853 (t-180) - 0.0054 (t-180) h - 2.288, & t > 180 \end{cases} \quad (6)$$

下边界,地表下 5 m

$$T = \begin{cases} 9 \times 10^{-7} t^3 - 3 \times 10^{-4} t^2 + 0.0122 t - 0.7102, & t \leq 120 \\ -5 \times 10^{-7} (t-120)^3 + 9 \times 10^{-5} (t-120)^2 - 3 \times 10^{-4} t - 1.6968, & 120 < t \leq 240 \\ -5 \times 10^{-8} (t-240)^3 - 7 \times 10^{-6} (t-240)^2 + 0.0053 t - 1.1484, & 240 < t \leq 360 \end{cases} \quad (7)$$

式中: T 为边界点的温度($^{\circ}\text{C}$); t 为计算点位时间(d); h 为计算点位距下边界的高度(m)。

将上述边界条件编成 fortran 子程序,以 * user =

*.for 的格式导入 ABAQUS。

1.4 温度场数值模拟结果

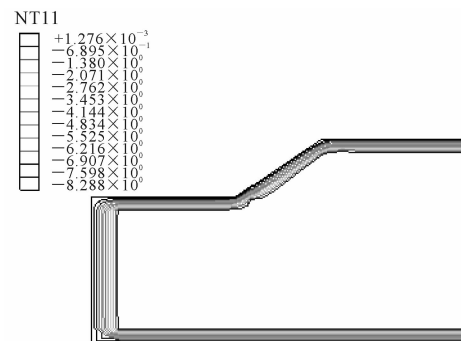
通过数值模拟,得出 1 月、4 月、8 月、11 月份的路基温度场随时间变化的等值线,如图 2 所示。图中,NT11 表示竖向温度。

可以看出,路基土是从表面逐渐向内融化,外界温度决定了路基土内部核心是否融化;外界温度较低,路基土内部还会存在冻土核;外界温度足够高,则路基土内部可能全部融化。路基温度的变化造成了路基土强度的变化,是导致路基土固结沉降的主要原因。

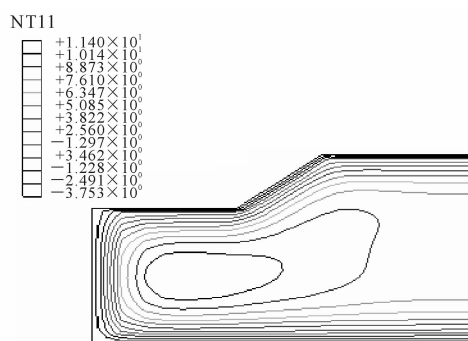
2 冻土路基融沉的数值分析

2.1 冻土融沉分析

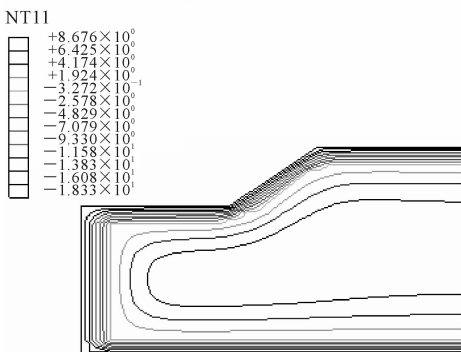
将温度场计算结果作为场变量引入冻土融沉数值计算中,冻土融沉数值模型的几何尺寸、节点数和单元数与温度场模型相同。模型侧面 x 方向约束,底面 y 方向约束,模型顶面自由且为不透水面,底面为透水边界条件,土基与路堤相接处按不透水情况计算。固结计算时间按冻土路基温度场的温度变化时间考虑,即 1 年(360 d),地基计算范围水平取坡脚向外各 5 m,深度方向按 5 m 考虑。



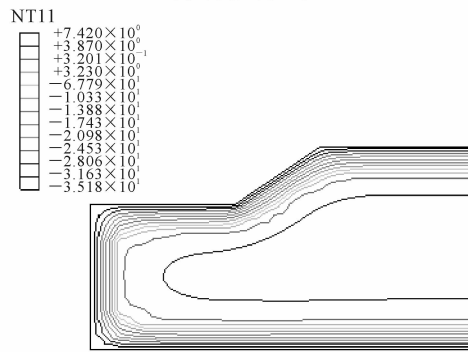
(a) 1 月份等值线



(b) 4 月份等值线



(c) 8 月份等值线



(d) 11 月份等值线

单位: $^{\circ}\text{C}$

图 2 不同月份温度场等值线

Fig. 2 Temperature contours of different months

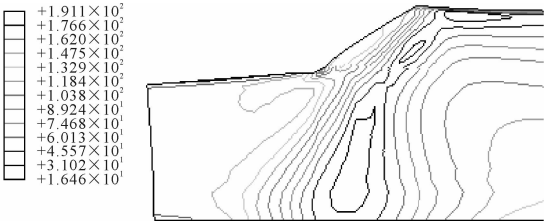
暂不考虑冰对土颗粒产生的应力作用,把土颗粒和冰的结合体统称为“土体”,水分与土体分开描述。分析过程土体颗粒看作是不可压缩的,其物理、力学参数不随温度变化,因此“土体”的所有变化都源于冰的变化,这种变化由土体的弹性模量及硬化参数随温度升高而减小来表现。在用 ABAQUS 进行温度场数值模拟时,在结果输出中设定将各节点的温度输出到 *.fil 文件中,然后在进行冻土冻融变形模拟中,把温度场作为场变量,从结果文件 *.fil 中用 * temperature, file = *.fil 导入,考虑温度变化过程中,材料参数的变化,定义材料弹性模量、硬化参数、孔隙比及渗透系数等为温度的函数,路基土初始参数见表 2。

表 2 土基计算参数取值

Tab. 2 Material parameters of subgrade

渗透系数	土重度/(kN·m ⁻³)	侧压力系数	压缩指数	回弹指数
1×10 ⁻⁶	17.5×10 ⁻⁴	0.5	0.06	0.01

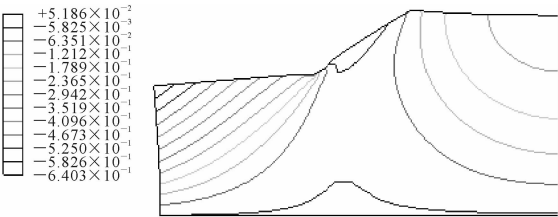
图 3 是路基应力等值线图,图 4 为位移等值线图。由图可见,由于有较高的路堤,路基土从天然地表处开始变形,由坡脚处产生应力,到天然地表的自由表面产生较明显的变形;固结后,路堤处位移曲线呈现规律的类似抛物线的曲线形状,坡脚处位移曲线呈线性和半抛物线分布,路基顶面位移呈二次抛物线分布(图 5)。



单位: Pa

图 3 路基应力等值线

Fig. 3 Stress contours in subgrade



单位: m

图 4 位移等值线

Fig. 4 Displacement contours of subgrade

2.2 融深对地基沉降变形的影响

改变模型的温度边界条件,必然导致地基的融化深度不同,因此计算所得的地表沉降变形也因之

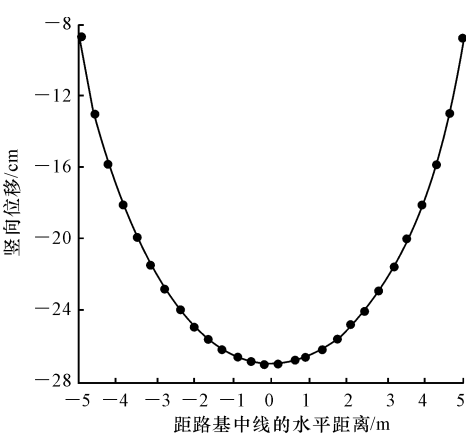


图 5 路基顶面位移曲线

Fig. 5 Displacement curve on surface of subgrade

而异。本文改变了温度场边界条件作用的高度及位置,计算如图 6 所示,表示地基融深分别为 0.5、1.2、3.0 m 时地表沉降曲线。结果显示,对于不同的冻土融化深度,当融深较大时,固结沉降亦较大,而融深较小,则沉降变形小。说明在多年冻土地区修建公路,应采取措施保护冻土上限,减小路基融化深度,从而减小路基沉降变形,提高路基稳定性。

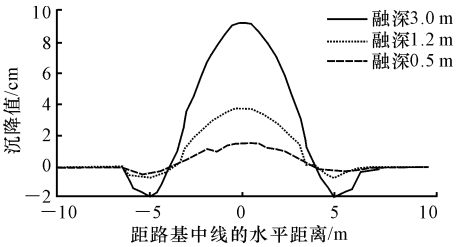


图 6 不同融深路基表面沉降曲线

Fig. 6 Thaw settlement curves of subgrade with different thaw depths

2.3 融沉曲线的回归

路基的融沉变形实质是一个累积变形,在夏季由于路基土的融化,融沉变形逐渐发展和增加,而冬季路基土冻结后,沉降变形不再增大。当冻胀严重时,路基可能会产生隆起变形,到次年夏季后融沉变形才又继续增大。因此多年冻土路基的融沉变形是一个复杂的过程,影响因素也很多,所建立的理论模型难免与实际情况有所不同。本文计算结果如下页图 7 所示,融沉变形是对称的。但是,实际情况中存在着左右两边坡的气候差异等,导致融沉变形不是完全对称的。但本文所建立模型的理论计算值仍可用于实际工程计算与分析的参考。

路基发生热融沉陷,其产生的变形形状可以通过竖向沉降变形进行回归分析,截取横向宽度范围内回归不同融沉深度时路基的变形曲线。可以看

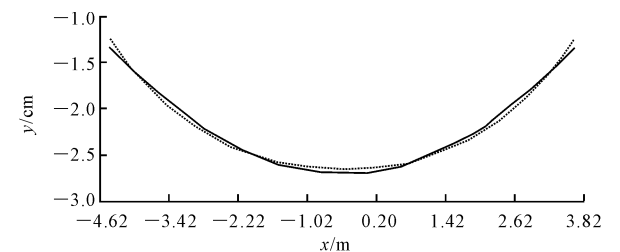


图 7 路基融沉拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves for thaw settlement of subgrade

出,路基融沉变形曲线有一定规律性,曲线形状近似于抛物线形状。将融沉盆曲线回归成二次多项式,公式为

$$y=0.01(x-12.8)^2-2.736\ 4,\ R^2=0.991\ 5\ (8)$$

式中: y 为沉降值; x 为距路基中线的水平距离。

3 冻土融沉对路面结构的影响

3.1 无融沉时路面的应力分析

结合青藏公路的实体工程,分析沥青路面的力

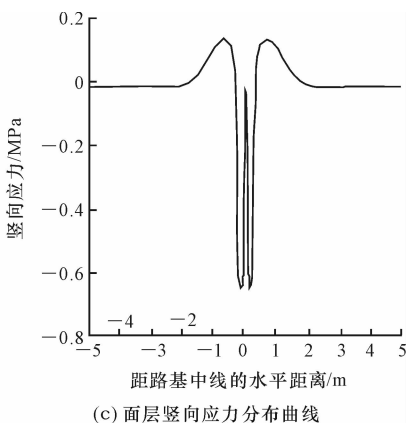
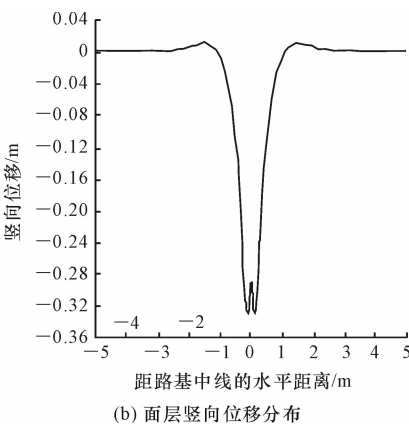
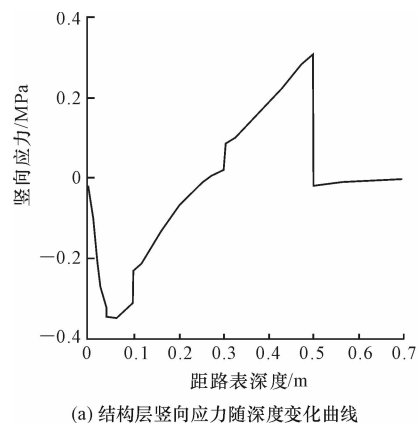


图 8 无融沉时路面结构的力学响应

Fig. 8 Mechanical response of pavement without thaw settlement

3.2 融沉附加应力分析

为了突出路面结构受融沉的影响,将路基土和地基及边界接触条件等价简化,只考虑路面结构在位移边界条件为二次融沉曲线时的附加应力。由于前面温度场计算时没有考虑路基边坡阴阳面的差别,因此在附加应力分析计算中暂未考虑阴阳坡效应。路面中心、水平方向约束,竖直方向无约束,路面表面与侧面为自由边。融沉曲线的纵轴取模型中心线,在施加边界条件时,采用 fortran 语言编制 user = *.for 文件,代入程序计算。沥青路面融沉附加应力分析结果如下页图 9~图 11 所示。图 9 表明,在有无融沉的情况下,同一种路面结构的纵深方向应力变化的大体趋势是一致的。都是在面层及碎石层受压,基层受拉,唯一不同在于垫层处,有融沉的路面结构垫

学响应,路面结构及参数见表 3。

表 3 典型结构及参数

Tab. 3 Pavement structure and material parameters					
材料	AC-13	AC-20	沥青稳定碎石	水泥稳定碎石	砂砾垫层
厚度/cm	4	6	20	20	20
模量/MPa	1 400	1 300	1 200	1 500	300

暂不考虑融沉的影响,对标准双圆均布荷载作用下各种沥青路面结构的路面应力状况进行分析。在 BZZ-100 标准双圆均布荷载作用下,路面结构力学响应如图 8 所示。在第 1 层底 4 cm 处,压应力达到最大,约为 0.31 MPa。在 30 cm 深处即水稳层,开始出现拉应力,拉应力最大值约为 0.35 MPa。总体趋势是随深度的增加,先增大后减小。面层的竖向位移发生在荷载作用附近,数值较小。面层在荷载作用附近外围,出现 0.1 MPa 左右的拉应力。图中纵向指沿着双圆荷载中心处深度方向。

层仍然受拉,且垫层底拉力逐渐变大,而无融沉的路面结构垫层内应力很小。有融沉的路面其受力显然不及无融沉的路面。图 10 是路面结构上面层顶在有无融沉的情况下拉应力的对比图。无融沉的路面结构,仅在荷载作用处出现小范围的受压;有融沉的路面结构,在整个路面宽度范围内都存在受压,并且在荷载作用范围内,应力值都大于无融沉情况下的应力值。图 11 表明,有融沉的路面结构基层底受拉,而无融沉的路面结构、基层底的拉应力很小。

4 结 语

(1)路基土是从表面逐渐向内融化,外界温度较低时,路基土内部还存在冻土核;外界温度足够高时,路基土内部可能会全部融化。

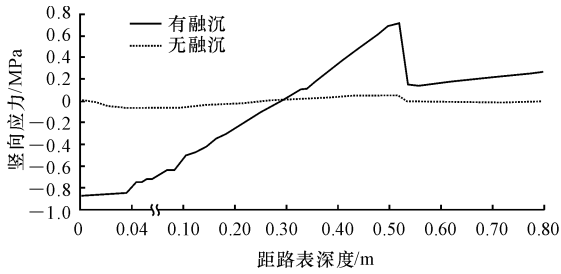


图9 沿深度方向的竖向应力对比

Fig. 9 Comparison of vertical stresses along parent depth

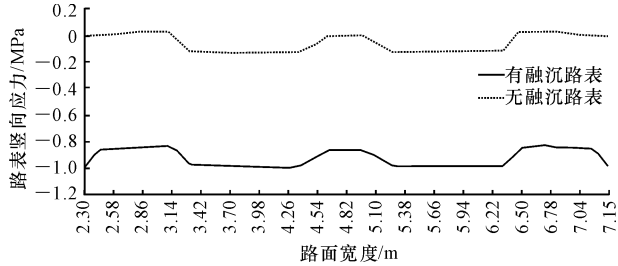


图10 沿宽度方向路表的竖向应力对比

Fig. 10 Comparison of vertical stresses along width on surface of parent

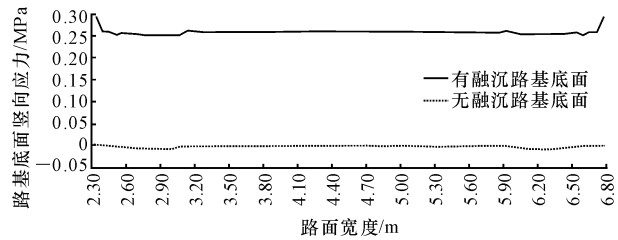


图11 沿宽度方向路基底面竖向应力对比

Fig. 11 Comparison of vertical stresses along width at bottom of subgrade

(2)对于不同的冻土融化深度,当融深较大时,固结沉降亦较大,而融深较小,则沉降变形小。

(3)路基融沉变形曲线有一定规律性,曲线形状近似于抛物线形状;以融沉二次曲线为位移边界条件,对有无融沉时路面结构的力学响应进行了对比分析,表明融沉对于路面结构的受力非常不利。

(4)不同结构类型的沥青路面在冻土融沉下的力学响应不同,尤其是基层类型对冻土融沉的适应性还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 汪双杰,陈建兵,章金钊,等. 青藏高原多年冻土区公路修筑技术之进展[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(1): 8-15.
WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, ZHANG Jin-zhao, et

- al. Development of highway construction technology in Qinghai-tibet permafrost regions[J]. Science in China Series E: Technology Science, 2009, 39(1): 8-15.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research; 2013[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [3] 陈建兵,汪双杰,章金钊,等. 青藏公路高路基病害的形成及其机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 30-35.
CHEN Jian-bing, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao. Formation and mechanism of high subgrade disease of Qinghai-Tibet highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 30-35.
- [4] 李祝龙. 青藏公路路基路面病害机理研究[J]. 公路, 2001, 8(8): 105-109.
LI Zhu-long. Mechanism of subgrade disease of Qinghai-Tibet highway[J]. Highway, 2001, 8(8): 105-109.
- [5] 裴建中, 窦明健, 胡长顺, 等. 多年冻土地区路基纵向裂缝影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(6): 15-18.
PEI Jian-zhong, DOU Ming-jian, HU Chang-shun, et al. Influence factors of embankment longitudinal cracks in permafrost regions[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(6): 15-18.
- [6] 侯曙光,汪双杰. 基于相空间重构及 PLS 法的冻土路基变形预测[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 65-69.
HOU Shu-guang, WANG Shuang-jie. Permafrost subgrade deformation forecast based on phase space reconstruction and partial least squares regression[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 65-69.
- [7] 张喜发,陈继,张冬青. 融沉系数在季冻区高速公路路基冻害研究中的应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 634-638.
ZHANG Xi-fa, CHEN Ji, ZHANG Dong-qing. Application of thawing settlement coefficient to the research on the roadbed frost damage of freeway in seasonal frost region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 634-638.
- [8] 汪海年, 窦明健. 青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 11-15.
WANG Hai-nian, DOU Ming-jian. Numerical simulation of thermal field in permafrost embankments of Qinghai-Tibet highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 11-15.